

COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UN REVÊTEMENT DE CHROME DÉPOSÉ SUR UN SUBSTRAT EN ALLIAGE DE ZIRCONIUM

D. V. Nguyen ^a, M. Le Saux ^b, L. Gélébart ^c, J.C. Brachet ^d

DEN-Service de Recherches Métallurgiques Appliquées (SRMA), CEA, Université Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France; ^a DucVinh.NGUYEN@cea.fr; ^b matthieu.le_saux@ensta-bretagne.fr; ^c Lionel.GELEBART@cea.fr; ^d Jean-Christophe.BRACHET@cea.fr

Mots-clés : Enhanced Accident Tolerant Fuel (EATF), gaine de combustible, revêtement de chrome, fissuration.

Résumé

Le comportement mécanique d'un revêtement de chrome déposé sur un substrat en alliage de zirconium par un procédé particulier de type dépôt physique en phase vapeur est étudié à l'aide de différentes techniques expérimentales à différentes échelles. L'attention est portée notamment sur la cinétique de fissuration du revêtement en fonction de la direction principale et de la biaxialité du chargement et de la température.

1 Introduction

Le CEA développe, en collaboration avec Framatome et EDF, un concept innovant de gainage base zirconium revêtu de chrome dans le but d'améliorer la robustesse des gaines de combustible des réacteurs nucléaires à eau pressurisée. Il a été montré qu'un revêtement de chrome de quelques microns d'épaisseur, déposé selon un procédé particulier de dépôt physique en phase vapeur (brevet CEA) permet de ralentir significativement l'oxydation de la gaine d'environ 580 μm d'épaisseur [1, 2]. Ces travaux de thèse ont pour objectif d'étudier le comportement mécanique d'un tel revêtement, notamment son endommagement et sa fissuration qui doivent rester limités en conditions d'utilisation en réacteur pour que le revêtement joue toujours son rôle protecteur .

2 Méthodes

L'endommagement du revêtement est étudié à travers différentes techniques expérimentales notamment :

- Essais de traction *in-situ* sous Microscope Electronique à Balayage (MEB), sur des plaquettes en alliage de Zr revêtues d'environ 15 μm de chrome dans le but d'étudier la plasticité, le mode de rupture et la cinétique d'endommagement du revêtement. Les déformations locales du revêtement sont mesurées par corrélation d'images numériques.
- Essais « biaxés » sur des tubes en alliage de Zr revêtus d'environ 15 μm de chrome en surface externe pour étudier la cinétique de fissuration du revêtement en fonction de l'état biaxial du chargement (pression interne + traction axiale) grâce à la corrélation d'images numériques et un système d'émission acoustique.

Des caractérisations par microscopie électronique en transmission et des essais de compression sur micro-piliers sont envisagées pour étudier le comportement du revêtement de chrome aux échelles inférieures.

Les simulations numériques à l'aide de la méthode des éléments finis (Cast3M) et reposant sur la méthode de la transformation de Fourier rapide (AMITEX_FFPT) seront mises en place pour étudier la distribution des contraintes et des déformations dans le revêtement et le substrat avant et après la fissuration du revêtement et ainsi correctement interpréter les résultats expérimentaux.

3 Premiers résultats

Les premiers essais réalisés à la température ambiante ont permis de déterminer le mécanisme de fissuration du revêtement à l'échelle macroscopique. Les fissures se propagent préférentiellement dans la direction perpendiculaire à la direction de la contrainte principale maximale sur la surface libre du revêtement. Des analyses par diffraction des électrons rétrodiffusés sur la surface libre autour de fissures peu ouvertes ont montré leurs caractères à la fois intergranulaire et intragranulaire, avec des proportions comparables. À travers des champs de

déformations locales mesurées par corrélation d'images lors de l'essai de traction *in-situ* sous MEB, on trouve qu'après la formation des premières fissures, les pavés non fissurés du revêtement de chrome semblent continuer à se plastifier à la température ambiante au lieu de former des nouvelles fissures. Des observations post-essai ont montré que les fissures se propagent dans toute l'épaisseur du revêtement mais ne pénètrent quasiment pas dans le substrat. Aucune décohésion du revêtement n'a été observée.

4 Conclusion

Les essais engagés ont donné des premières informations sur l'endommagement du revêtement de chrome à la température ambiante. Des simulations numériques sont nécessaires pour étudier l'influence de la plasticité macroscopique du substrat sur la fissuration du revêtement et ainsi essayer d'expliquer la plasticité du revêtement après la formation des premières fissures. Par ailleurs, il est prévu d'étudier l'influence de la température sur le comportement mécanique du revêtement, en réalisant des caractérisations à 350°C notamment (i.e. au voisinage de la température de la gaine en conditions nominales d'utilisation en réacteur).

Remerciements

Cette étude est réalisée grâce au financement du CEA, d'EDF et de Framatome.

Références

- [1] J.C. Brachet et al. CEA studies on advanced nuclear fuel claddings for enhanced Accident Tolerant LWRs Fuel (LOCA and beyond LOCA conditions), *Proceedings of the 8th. Int. Symposium Fontevraud 8 on Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs' Safety, Performance and Reliability*, Avignon, France, 14-18 Septembre 2014.
- [2] J. BISCHOFF, et al. AREVA NP's enhanced accident tolerant fuel developments : Focus on Cr-coated m5 cladding, *Nuclear Engineering and Technology* , 50 (2018) 223-228.